

微结构塑件注射成型特性实验研究

宋满仓*, 张传赞, 刘莹, 刘军山, 刘冲

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 设计制造了一可成型具有微结构的塑件(微流控芯片)注塑模具, 利用单因素实验方法研究了各种工艺参数(注射速度、模具温度、注射压力、保压压力和保压时间)对微结构复制不完全和表面缩痕这两种主要缺陷的影响. 实验结果表明注射速度和模具温度是影响微结构复制不完全的主要因素; 注射压力相对于注射速度和模具温度仅起次要作用; 保压压力对其影响较为复杂, 复制度随着保压压力的增加先提高后降低. 影响芯片表面缩痕的主要因素是模具温度和保压压力. 保压时间对微结构复制度的影响很小, 但却是塑件整体翘曲变形的主要原因.

关键词: 微流控芯片; 微结构塑件; 复制; 缩痕; 工艺参数

中图分类号: TQ320 **文献标志码:** A

0 引言

近年来, 微注塑成型技术已成为注塑成型领域一个重要的新兴发展方向. 一般地, 人们可将微注塑成型产品简单分为微小体积塑件和微结构塑件(具有微结构的常规尺度塑件)^[1]. 随着微机电系统(MEMS)和微系统(MST)的发展, 微结构塑件在光学和生物医学等众多领域的应用得到了产业界和学术界越来越多的关注. 最新的研究表明, 微结构塑件的市场份额从2005年的120亿美元预计增加到2009年的240亿美元^[2], 而用微注塑成型的微塑件占微结构塑件的比重也越来越大. 微注塑成型与常规注塑成型有很大的区别, 在传统注塑成型过程中可以忽略的粘度、壁面滑移、表面张力等对提高填充度不是很明显的因素, 在微注塑填充过程中会起到很重要的作用^[3]. 微注塑成型中, 由于要成型的微流道或微型腔尺寸比常规注塑成型的常规件小得多, 填充的难度也就相应增加, 微流道或微型腔填充不完全也就成了一个要解决的难点, 通过修改模具结构、改变微流道深宽比、调整工艺参数等方法, 此方面已取得很大的进展^[3~6], 但对微结构的可复制性的研究尚显不足. 本文以典型的微结构塑件——微流控芯片为研究对象, 通过实验系统地研究各主要注塑成型工艺参数对其成型中微结构的复制性和表面缩痕的影响,

从而给出该类微结构塑件合理的工艺解决方案.

1 实验部分

1.1 模具结构

微流控芯片(图1)的主要功能是把生物和化学等领域中涉及的样品制备、反应、分离、检测等基本操作单元集成在一块几平方厘米(甚至更小)的芯片上^[7]. 芯片上最重要的就是微通道, 如图1所示的“十字架”. 它的尺寸一般为10~100 μm 宽, 5~50 μm 深, 30~100 mm长. 成型微流控芯片最常用的方法是热压成型. 与热压成型相比, 微注塑成型效率更高, 更适合大批量生产. 但是用微注塑的方式精确完整地复制出微通道是保证芯片质量的关键, 也是研究的难点.

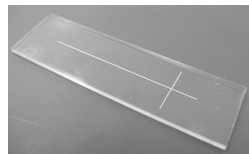


图1 微流控芯片

Fig. 1 Microfluidic chip

本实验用到的芯片整体尺寸长63 mm, 宽18 mm, 厚1.5 mm; 微通道长40 mm, 宽10 mm, 截面形状及尺寸如图2所示. 成型型芯采用微细加工中

常用的 UV-LIGA 技术制备. 芯片的整体是一较薄片, 故采用扇形浇口以达到熔体流动平缓 and 流动平衡的要求, 采用单边进料可获得单一流向的要求.

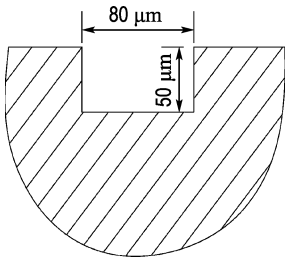


图 2 微通道截面图

Fig. 2 Cross section of micro-channel

1.2 成型实验

实验中, 注射成型微流控芯片的材料是聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA (CP-51). 注塑机使用的是德国生产的 BOY12A, 螺杆直径 18 mm, 最大注射速度 240 mm/s, 最大注射压力 179.5 MPa.

实验注射成型的芯片产生了两种很明显的成型缺陷: 一种是芯片的微通道复制不完整 (出现圆角), 如图 3 所示; 一种就是在芯片的十字架周围出现缩痕 (塑件表面产生凹坑、陷窝或者是收缩痕迹的现象), 如图 4 所示.



图 3 不完整复制

Fig. 3 Incomplete duplication



图 4 缩痕

Fig. 4 Sink mark

产生圆角的原因可能是流动熔体前锋在型腔微凸起处过早冷却产生滞流或凝固; 缩痕产生的原因是熔体温度太高, 或者是模具温度过高, 冷却不均匀.

1.3 实验结果分析方法

为了分析各因素对微通道成型质量的影响, 对实验获得的每一组注塑成型的微流控芯片在长

度方向上选取相同的位置进行切割, 在显微镜下拍摄截面照片 (如图 3 所示), 保存为 BMP 格式. 由于拍摄的截面照片微通道边缘不清晰, 直接测量开口宽度会产生很大的误差, 对结果的分析产生不良影响. 为此, 利用 MATLAB 的图像处理方式, 自编程序提取微通道边缘轮廓图 (如图 5 所示), 通过测量边缘轮廓开口宽度分析每种因素对微通道的影响.



图 5 边缘轮廓图

Fig. 5 Brim skeleton map

2 结果与讨论

2.1 注射速度的影响

实验中, 注塑成型工艺参数选择为模具温度 80 °C, 注射压力 110 MPa, 熔体温度 240 °C, 保压时间 10 s 等. 注射速度分别为 48、96、168、192、216、240 mm/s. 微通道的开口宽度 w 随着注射速度 v 变化的拟合曲线如图 6 所示.

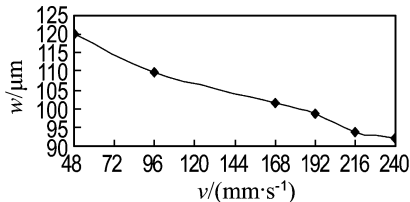


图 6 微通道开口宽度与注射速度的关系

Fig. 6 Relationship between micro-channel opening width and the injection rate

微通道开口宽度随着注射速度的增大而减小, 成型质量随着注射速度的增大而增加, 注射速度越高, 微特征结构的复制性就越好. 当注射速度达到 240 mm/s 时, 微通道的宽度已下降到接近 90 μm, 非常接近实际宽度, 基本上很好地复制了型腔的微凸起. 从芯片的整个表面观测, 在十字架周围并没有产生缩痕现象, 说明注射速度的变化不影响微流控芯片表面平整.

2.2 模具温度的影响

Liou 等^[8]验证了模具温度是影响微通道填充的重要因素, 通过对 PMMA 的注射填充发现:

当模具温度为 92 ℃ 时即使注射压力提升到 140 MPa 也填充不满微结构;当温度升到 120 ℃,在压力很小的情况下就能成型出非常好的微结构;但是当温度升到 160 ℃ 时,局部就会出现凸起.本实验中,设置注射速度为 168 mm/s,注射压力为 110 MPa,熔体温度为 240 ℃,模具温度分别为 60、70、80、90、100、115 ℃.微通道的开口宽度 w 随着模具温度 t 变化的拟合曲线如图 7 所示.

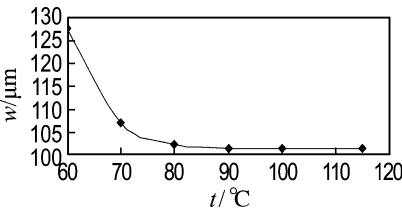


图 7 微通道开口宽度与模具温度的变化关系
Fig. 7 Relationship between micro-channel opening width and the mold temperature

微通道的开口宽度随着模具温度的升高而减小,但是当模具温度升到 90 ℃ 以后,开口宽度减小的趋势就趋于平缓,基本上不再随着模具温度的升高而下降.整体观测芯片表面发现,当模具温度高于 100 ℃ 时(PMMA 的玻璃体转变温度大约为 105 ℃),芯片表面产生缩痕现象,尤其在十字架附近缩痕更严重.

2.3 注射压力的影响

在研究注射压力对微通道填充度影响的注射过程中,设置注射速度为 168 mm/s,熔体温度为 240 ℃,模具温度为 80 ℃,注射压力分别为 85、100、115、130、140 MPa.微通道的开口宽度 w 随着注射压力 p 变化的拟合曲线如图 8 所示.

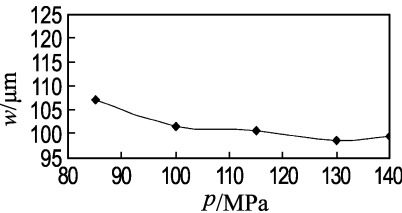


图 8 微通道开口宽度与注射压力的变化关系
Fig. 8 Relationship between micro-channel opening width and the injection pressure

微通道的开口宽度随着注射压力的增加而逐渐减小,但是减小的幅度不是很大,没有注射速度和模具温度对开口宽度的影响明显.从芯片的整个表面观测发现,注射压力对微流控芯片表面质量的影响不甚明显.注射压力为 85 MPa 和 160 MPa 时注射成型的芯片基本上看不出区别,在十

字架附近也没有出现缩痕.

2.4 保压压力的影响

研究保压压力对微通道填充度的影响要比其他因素复杂,因为在保压阶段,保压压力可以从大到小设置,也可以从小到大设置.本文分别针对这两种设置做了 4 次实验,表 1 和表 2 中的控制段 1~3 表示随时间变化的各段保压压力取值.表 1 是随着保压时间增加而保压压力增大的设置,即第 1 组;表 2 是随着保压时间增加而保压压力降低的设置,即第 2 组.其余参数设置为注射速度 168 mm/s,熔体温度 240 ℃,模具温度 80 ℃,注射压力 115 MPa.微通道的开口宽度随着保压压力变化的拟合曲线如图 9 所示.

表 1 第 1 组参数表
Tab. 1 Parameters of Group 1 MPa

No.	控制段		
	1	2	3
1	80	90	100
2	60	70	80
3	40	50	60
4	20	30	40

表 2 第 2 组参数表
Tab. 2 Parameters of Group 2 MPa

No.	控制段		
	1	2	3
1	100	90	80
2	80	70	60
3	60	50	40
4	40	30	20

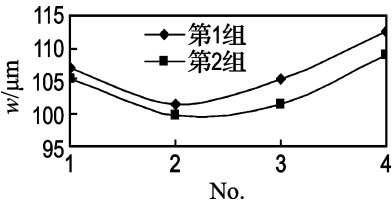


图 9 微通道开口宽度与保压压力的变化关系
Fig. 9 Relationship between micro-channel opening width and the holding pressure

从图 9 中可明显看出,第 2 组要比第 1 组的开口宽度小,也就表明保压压力的设置从大到小对微通道复制度的提高影响更大.从这两组曲线还可得到,保压压力很小时,开口宽度大,随着保压压力的增大,开口宽度也随着减小,保压压力继续增大,开口宽度反而增大了,因而要求选取一个合适的保压压力.观测芯片的整体表面,保压压力很小时,微流控芯片表面产生缩痕,尤其是在十字

架附近更为明显. 而且第2组的芯片表面质量要好于第1组的表面质量.

同时,还观察到保压时间对芯片成型质量的影响不是很明显.但是从芯片整体上看,保压时间太短时,有明显的翘曲变形;保压时间过长,芯片十字架附近有缩痕产生.

3 结 论

(1)模具温度和注射速度对微结构复制制度的影响最大.注射速度越高,复制制度也越高;模具温度越高,复制制度也越高,但是温度高于100℃后,芯片表面会产生缩痕现象.

(2)注射压力对微结构复制制度的影响能力远低于模具温度和注射速度,提高注射压力对改善微结构复制制度的影响不甚明显.

(3)保压压力很低时,微通道的复制制度很低,随着保压压力的增加,复制制度也随之提高,继续增加时,微通道的复制制度反而降低.保压时间对芯片的翘曲变形有显著的影响,对微通道的复制制度基本不产生影响.

参考文献:

[1] XU G J, YU L Y, LEE L J, *et al.* Experimental and numerical studies of injection molding with microfeatures [J]. **Polymer Engineering and Science**,

2005, **42**(6):866-875

[2] JULIEN G, THIERRY C, PATRICE M. Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review [J]. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, 2007, **17**(1):96-109

[3] YAO D G, KIM B. Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials [J]. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, 2002, **12**(5):604-610

[4] ONG N S, KOH Y H. Experimental investigation into micro injection molding of plastic parts [J]. **Materials and Manufacturing Processes**, 2005, **20**(2):245-253

[5] THEILALE U A, HANSEN H N. Surface microstructure replication in injection molding [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2007, **33**(1-2):157-166

[6] SHEN Y K, WU W Y. An analysis of the three-dimensional micro-injection molding [J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2002, **29**(3):423-431

[7] 林炳承. 微流控芯片实验室及其功能化 [J]. 中国药科大学学报, 2003, **34**(1):1-6

[8] LIOU A C, CHEN R H. Injection molding of polymer micro- and sub-micron structures with high-aspect ratios [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2006, **28**(11-12):1097-1103

Experimental research on injection molding characteristics for micro-structure plastic parts

SONG Man-cang*, ZHANG Chuan-zan, LIU Ying, LIU Jun-shan, LIU Chong

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An injection mold in which microfluidic chip (a kind of micro-structure plastic part) can be molded is designed and manufactured. Using the single-factor experimental method, the influence of different process parameters (injection rate, mold temperature, injection pressure, holding pressure and time) on the incomplete duplication and sink mark of micro-structure plastic parts is discussed. The results show that injection rate and mold temperature are the principal factors in the incomplete duplication, and injection pressure is the secondary factor. The influence of holding pressure on the incomplete duplication is complicated, that is with the increasing of holding pressure, the degree of duplication reduces after the first increase. Mold temperature and holding pressure are two main influence factors on sink mark. Holding time has a negligible effect on the incomplete duplication, but it is the main reason for the warpage deformation.

Key words: microfluidic chip; micro-structure plastic part; duplication; sink mark; process parameter